

# 大质量恒星的形成 :理论与观测\*

江治波<sup>†</sup> 杨 戟

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

**摘 要** 文章简要叙述了有关大质量恒星形成的理论以及相关观测证据. 目前大质量恒星形成的理论主要有两种,即吸积说和并合说. 吸积说认为,大质量星可能与小质量星形成于相似的过程;并合说主张大质量星可能是由小质量年轻星碰撞合并而成. 解决这两种理论争论的关键在于在大质量星附近能否观测到吸积盘的存在,最新的观测表明大质量星更有可能是通过吸积增加自身的质量,但最终解决这一问题可能还需要更多的观测证据. 文章还提出了一些本领域尚未解决的问题,为感兴趣的研究者提供参考.

**关键词** 恒星形成,大质量星,分子云,年轻星星团

## Massive star formation : theories and observations

JIANG Zhi-Bo<sup>†</sup> YANG Ji

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academic of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** We briefly describe the theories of the formation of massive stars and related observational evidence. There are two main theories concerning massive star formation, accretion and merger. The accretion scenario suggests that massive stars are formed in a similar process as low-mass stars, while the merging scenario proposes that massive stars are formed when low-mass young stellar objects collide and merge with each other. A key point to settle the dispute between the two theories is whether there exists a circumstellar disk around the massive star. Recent observations suggest that massive stars are more likely to be formed through a process of mass accretion from their circumstellar disks. However, it will take time for the dispute to be finally settled. Some questions in the field of massive star formation that remain to be solved are brought up for the sake of those interested.

**Keywords** star formation, massive star, molecular cloud, young stellar cluster

## 1 引言

恒星是茫茫宇宙中除太阳、月亮和少数行星之外最引人注目的天体. 早在上古时代,人们对恒星充满了好奇与幻想,中外都流行着非常动人的神话传说. 然而,直到望远镜出现后,人们才对恒星有了最基本的认识,了解到恒星在天空中并不是恒定不变的. 到了20世纪初,爱因斯坦发表了著名的质能关系,人们对原子核反应所产生的巨大能量逐步认识,知道了恒星能量的来源,才渐渐认识到恒星本身也有生命周期,它们像人一样会出生、生长、老去直至死亡. 然而,恒星的出生在相当长的时间里还是个谜,直到20世纪60年代,天文学家在星际空间发现

了分子气体,以及嵌埋其中的低温原恒星(protostar),才对恒星的出生场所及过程有了最初步的了解.

经过40年的研究,天文学家对恒星的出生过程有了相当充分的理解,特别对小质量恒星而言更是如此. 现在已经很清楚,恒星是在以分子气体为主的星际分子云中生成的,由于分子云自身的引力作用,开始自身的塌缩并形成所谓的年轻星天体(young stellar objects),这些年轻星天体经过快速演化最终形成恒星. 为了对恒星进行分类,天文学家将小于太阳质量3倍的恒星称为小质量星,3—8倍的称为中等质量星,而大于8倍太阳质量的则称为大质量星.

\* 国家自然科学基金(批准号:10473022,10133020)资助项目

2006-03-21 收到初稿 2006-03-28 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: zbjian@pmo.ac.cn

这一分类并不仅仅是表象的不同,事实上它代表了不同类型的恒星形成时不同的物理过程。

## 2 小质量恒星形成的理论与观测

一般认为,恒星是通过分子云核(molecular core)的塌缩而形成的。在银河系内,存在一类由分子气体组成的天体,由于它们呈弥散的云雾状形态,因此被称为分子云(molecular cloud),其总质量约占银河系可视物质质量的1%,其温度很低,大约为10K。分子云在星际空间缓慢演化,在某些局部形成密度相对较高的区域,被称为分子云核。随着分子云核的进一步演化,其内部的热运动压力不能再抵御自身的引力,便开始了所谓引力塌缩,最终形成恒星。根据研究,从分子云核演化成一顆恒星经过了以下4个阶段<sup>[1,2]</sup>:

(1) 云核阶段:分子云核内气体运动压力、磁压、引力及外部压力处于基本平衡状态,云核缓慢收缩,温度开始缓慢上升,形成热分子云核;

(2) 主塌缩阶段:当分子云核的内部压力不能抵抗自身引力时,就开始了塌缩。由于云核中心密度较高,塌缩区域最初位于中心,并以当地声速向外扩张,这就构成“先内后外”的塌缩(inside-out collapse)。塌缩形成一个致密的核心,巨大的引力能使中心温度迅速升高。由于云核的自转,外部物质不会直接落到核心,而是在核心周围形成一个致密的盘状结构,称为吸积盘(accretion disk);

(3) 主吸积阶段:由于角动量及磁通量守恒原理,最终成为恒星组成部分的物质并不能直接落到中心星上,而是落在吸积盘上,吸积盘通过一系列复杂的过程,将多余的角动量向外传递,使中心星的质量得以继续增加,因此,吸积盘在恒星形成活动中起了至关重要的作用。在此期间,为了释放角动量,系统还通过目前尚不可知的机制向两极方向抛射物质,形成质量外流(outflow)。恒星的大部分质量都是通过吸积获得的,巨大的引力能使中心星的温度急剧上升,从而点燃了星中心区域的氘。

(4) 残余物质驱散阶段:质量外流在这一阶段继续存在,外流与星风的作用使恒星形成的残余物质远离中心星,星周物质以及盘物质变得稀薄,外流的开口张角渐渐变大。中心星仍然从盘中吸积物质,但其速率已经很小,中心星的质量不会再有实质性的增长,更多的是准静态收缩。中心星的核心部分这时可能已经开始了氢燃烧,外部出现了对流层。当这

一阶段结束时,我们就可以在宇宙空间看见一颗性质不同的恒星,被称为主序星。

以上4个阶段为小质量恒星形成理论所预言,而在观测上都得到了证实。在观测上,天文学家利用不同波段的观测发现了4类年轻星天体,其能谱特征基本符合上述4个阶段。他们还发现了围绕小质量年轻星天体的吸积盘<sup>[3,4]</sup>,以及伴随恒星形成活动的质量外流。质量外流在电磁波的各个波段都有表现,如射电波段的分子外流及喷流<sup>[5]</sup>,红外波段的喷流<sup>[6]</sup>,以及光学波段的赫比格-哈罗天体(Herbig-Haro object)<sup>[7,8]</sup>。光学和红外光谱观测还发现了年轻星天体的质量吸积特征,有几项射电波段的观测声称找到了分子云核的塌缩特征,虽然这些观测还需要进一步的证实。

总之,虽然在一些细节上还有待证实,小质量星的形成之谜已经为天文学家所揭示,由此发展的小质量星形成理论被认为是正确的。

## 3 大质量恒星的形成理论与观测

### 3.1 基本观测事实

虽然只是在质量上比小质量星大若干倍,从恒星数目的质量分布规律[称为初始质量函数,(initial mass function)]看,大质量星总质量只占恒星总质量的一小部分,但是,大质量星辐射的光度远远超过小质量星,例如,一颗10倍太阳质量的恒星的光度可达到太阳光度的 $10^3$ 至 $10^4$ 倍,因此大质量星是银河系乃至所有星系光子的主要贡献者。由于它们光度巨大,为其提供能源的核反应速率非常快,与类太阳小质量星具有的约 $10^{10}$ 年的寿命形成对比,它们在 $10^6$ 至 $10^7$ 年内就能消耗完其核燃料,发生超新星爆发,将核合成的产物重元素抛射到宇宙空间,因此,大质量星还是宇宙重元素的主要贡献者,也是宇宙化学演化的主要推动者。由此可知,研究大质量星的形成与演化对研究银河系乃至宇宙的演化是非常重要的。

然而,与小质量星比较,大质量星的形成研究却相对滞后得多,其主要原因是大质量星的数目较少,而经过主序前的演化阶段时间较快,因此可观测的几率较低;另一个原因是距离太阳系较近的恒星形成区里缺少大质量的年轻星天体,难以进行高清晰的观测,同时,大质量星一般与其他小质量星成团形成,在分辨率不充分的情况下,很难将所观测的现象与大质量星唯一地联系在一起。

虽然如此,大质量年轻星的观测还是取得了令人刮目的成就. 目前已知的观测事实是,大质量星总是在质量巨大的分子云复合体(giant molecular cloud)中形成,它们总是与包含 $\sim 10^2$ 至 $10^4$ 颗成员星的年轻星团(young stellar cluster)成协(即这些天体两两或更多相距较近并有物理联系)<sup>[9]</sup>. 大质量星的表面温度很高,可达 $10^4$ 度以上,产生大量的紫外光子,电离其周围的气体,这种电离气体的主要成分是离子氢,因而被称为电离氢区(HII region). 在大质量年轻星的演化初期,其周围的电离氢区尺寸很小,只有10至 $10^2$ 天文单位(日地平均距离),这类电离氢区被称为超致密电离氢区(ultra-compact HII region)<sup>[10]</sup>. 随着大质量星的演化,电离氢区不断向外扩张. 还有一种有趣的现象,那就是大质量年轻星通常更趋向于分布在星团的中心部分,这一现象被称为质量分层(mass segregation),由于星团的年龄一般为 $10^6$ 至 $10^7$ 年,在这样短的时间内仅仅依靠动力学演化的效应似乎难以产生这种现象,因此质量分层现象很可能代表大质量星的初始状态,这也为天文学家反推大质量星的形成条件提供了限制性条件.

### 3.2 大质量星形成理论及困难

大质量星能否像小质量星那样,通过塌缩和吸积而成?这是一个很自然的想法.但在经典的理论模型计算中,如果使用与小质量星相同的模型参数,则当年轻星的质量大于太阳的10倍时,它所释放的光子光压足以抵御自身的引力,使得吸积盘中的物质所受的净力方向向外,从而停止吸积过程,中心星的质量不再继续增加.这意味着恒星的最终质量为10倍太阳质量,但这与实际情形是明显不符的,因为已经观测到100倍太阳质量的恒星.

当然,在不改变基本假设的情况下也有解决这一困难的方法.例如,理论天体物理学家提出,减小星周物质的不透明度,可以使它们所受到的光压减小,理论上,这种假设可以使恒星的最终质量达到太阳质量的40倍<sup>[11]</sup>.另外,考虑到外流的存在,如果大量光子从年轻星的两极溢出(因为两极的物质相对稀薄),能有效地释放光压.最新的理论研究表明,如果光子从外流所形成的空腔中逃逸,可以使恒星最终质量达到60倍太阳质量,甚至更大<sup>[12]</sup>.

为解决大质量星的光压使吸积停止这一困难,有人提出了另一种思路,即并合说<sup>[13]</sup>.这种假说是基于大质量星总是与其他小质量星成团出现的观测

事实.并合说主张,在最初阶段,通过分子云核的塌缩,形成一团小质量年轻星天体,这些天体经过一段时间的动力学演化,越来越接近,最后发生碰撞并合并在一起,形成大质量星.这一理论同样存在一些弱点.首先,目前观测到的恒星形成区的年龄一般在 $10^6$ 至 $10^7$ 年之间,这意味着,大质量星必须在这段时间内形成,要使小质量星团在如此短的时间里发生碰撞合并,需要非常高的星团密度,计算表明,这一密度必须大于每立方光年 $10^6$ 颗年轻星.然而,目前观测到的最大星团密度约为每立方光年 $10^3$ 颗,比所需的数值小了3个量级.其次,年轻星发生并合时,能释放巨大的引力能,其光度将会增加几个量级,不亚于一颗超新星的爆发,同时还可能伴随高能的活动现象,如 $\gamma$ 射线暴及X射线暴,上述现象在目前为止的观测中未得到证实.

至此,理论天体物理学家提供了两种不同的大质量星形成的模式,即吸积说(像小质量星形成一样)与并合说.解决争论的唯一途径是通过观测,但由于目前的观测条件所限,我们不能直接看见发生在大质量星附近的事件,只能通过观测大质量周围的现象推测理论的正确性.回忆小质量星形成的理论,可知吸积学说预言恒星形成时存在双极质量外流以及吸积盘.另一方面,并合说指出,由于年轻星碰撞合并等剧烈的动力学过程,星周盘将在这一过程中被瓦解,并合时可能引发物质的向外喷射,与外流有些相似,但一般不会出现高准直的双极型形态.

### 3.3 观测证据

至此可以知道,究竟是吸积说正确还是并合说正确,关键的证据在于年轻的大质量星周围是否存在盘,或者是否存在高准直的双极外流.目前天文学家通过射电观测在大质量恒星形成区发现了许多的外流,能量远远超过小质量恒星形成区的外流,其准直度却不如小质量星那样高.但最新的观测显示,随着观测的分辨率的提高,其准直性也变好<sup>[14]</sup>,暗示发自大质量年轻星的外流可能与小质量星外流的准直性相当.最近的观测还表明,大质量恒星形成区的外流是普遍存在的<sup>[15]</sup>,这似乎意味着大质量星的形成可能与小质量星有着相同的机制,但是,由于迄今为止的观测的分辨本领限制,还不能将外流和大质量星形成活动一一对应起来,因此可以认为大质量星本身是否伴随双极外流还缺乏足够的证据,搜寻盘的工作一直是天文学家形成研究的一个热点,天文学家利用多种不同的手段对盘的存在性进行研

究,从而在多方面找到大质量年轻星存在盘的证据,例如利用近红外高分辨光谱寻找来自大质量年轻星的吸积特征<sup>[16]</sup>,利用亚毫米波干涉阵进行高空间分辨率的观测表明原恒星尘埃盘的存在<sup>[17]</sup>,等等.

最令人兴奋的证据来自高空间分辨率的近红外偏振成像观测<sup>[18]</sup>,偏振是光波的基本性质之一,一般来说,发自恒星的光波是没有偏振的,当光波被恒星周边尘埃散射时就产生了偏振,其偏振方向垂直于入射方向.但是,如果光线被多次散射,由于入射光的方向变得随机,大量出射光子的偏振方向各不相同,总体效果使偏振度减小.因此,只有当恒星周边物质比较稀薄时,散射起偏最有效.利用这一原理,我们可以研究年轻星附近的物质分布.来自于星周物质的光线相对暗弱,通常被来自恒星本身的无偏振光线掩藏,这种方法的优势在于偏振观测是测量两个相互垂直方向上的偏振光强度并相减,取其相减后的剩余强度,从而消减掉恒星本身的光.利用世界最先进的地面光学/红外望远镜,我们对位于猎户座大分子云的 Becklin - Neugebauer 天体(简称为 BN 天体)进行了观测,发现了与该天体成协的一个偏振盘(polarization disk),由于该偏振盘在空间上被完全分辨,可以认为它就是 BN 天体的吸积盘. BN 天体是天空中最亮的近红外天体,是天文界公认的大质量年轻星,在它的周围发现吸积盘为大质量星的吸积理论提供了重要的观测证据.

虽然越来越多的证据倾向于吸积说,但由于目前存在吸积盘证据的年轻星天体的质量约为太阳质量的 8 至 15 倍,还不能完全排除更大质量的恒星可能是由并合而成的,例如,并合说的提出者认为,当恒星质量超过太阳的 40 倍时,可能并合起了主要作用,因此,为解决并合说与吸积说的争论,还需要更多的观测证据.

## 4 未解决的问题

除大质量恒星形成的基本机制外,还有许多目前尚未为人们了解的细节,值得我们深入去探讨,例如大质量星形成的初始条件就是一个很有趣的问题.前文已经提到,大质量星是在星团中形成的,并且倾向于形成于星团的中心部分,这为我们研究大质量星的形成环境提供了重要线索.根据理论,分子云核能否开始引力塌缩取决于它是否达到了金斯质量(Jeans mass),金斯质量  $M_J$  是表示气体引力不稳定性的一个量,其表示式为  $M_J \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$ ,其中  $T$  为

云的温度,  $\rho$  为云的密度.可以看出当密度增大时金斯质量减小,而在云核的中心密度较大,似乎应该更适合于小质量恒星的形成,这显然与观测到的大质量星向中心集聚相矛盾.一种可能的解释是,如果在云核中心附近有一些小质量星开始形成,势必加热云核中心使其升温,从而有效提高金斯质量.最近的研究表明,大质量星比其周围的小质量星更年轻<sup>[19]</sup>,从而为这一猜测提供了一份证据.但究竟是什么机制抑制云的塌缩,使之演化成更大金斯质量,目前还是个未解之谜.

但是,也有人提出竞争吸积理论<sup>[20]</sup>,它指出,大质量星与小质量星均形成于相似的环境,但随着星团的演化,有些年轻星天体处于更有利的位置,因此能吸积到更多的质量,从而形成大质量星.这种理论甚至能解释星团的初始质量函数,但由于它忽略了大质量星形成时对环境的强烈反馈,究竟正确与否,目前还在争论中.

大质量星与星团的关系如何,这也是天文学家普遍关心的问题.由于大质量星在形成时活动剧烈,对周边的影响也非常大,影响的范围也相当广阔.目前一个相当热门的话题是所谓的诱发恒星形成,其中一个可能性是大质量星形成时向外喷射的物质或形成后的大量紫外光子使处于平衡状态的分子云核压缩,从而导致云核自身的塌缩.目前这一机制还不十分清楚.

总之,虽然大质量星形成问题的研究已经进行了几十年,但人们对这一问题还缺乏充分的了解.随着近年来大型地面及空间望远镜的投入使用,天文学家对这类天体的形成过程有了越来越清晰的认识.目前国际上正在建设大型射电望远镜天线阵和酝酿新一代的望远镜(如 50m 口径的地面光学红外望远镜及 10m 口径的空间望远镜),相信在未来的二三十年内,大质量恒星形成之谜将最终为天文学家解开.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 杨戟. 物理, 2001, 30 : 712 [ Yang J. Wuli ( Physics ), 2001, 30 : 712 ( in Chinese ) ]
- [ 2 ] Shu F, Adams F C, Lizano S. Annu. Rev. Astro. Astrophys., 1987, 25 : 23
- [ 3 ] Yang J, Ohashi N, Yan J *et al.* 1997, Astrophys. J., 457 : 683
- [ 4 ] O'dell C R. Annu. Rev. Astro. Astrophys., 2001, 39 : 99
- [ 5 ] Goldsmith P F, Snell R L, Hemeon-Heyer M *et al.* Astrophys. J., 1984, 286 : 599

- [ 6 ] Zinnecker H , McCaughrean M J , Rayner J T. *Nature* , 1998 , 394 : 862
- [ 7 ] Herbig G H. *Astrophys. J.* , 1951 , 113 : 697
- [ 8 ] Haro G. *Astrophys. J.* 1952 , 115 : 572
- [ 9 ] Lada C. Formation and early evolution of stars : an observational perspective. In : *Molecular clouds and star formation*. Eds. Yuan C , You J. World Scientific , 1993. 1—46
- [ 10 ] Churchwell E. *Astron. Astrophys. Rev.* , 1990 , 2 : 79
- [ 11 ] Wolfire M G , Cassinelli J P. *Astrophys. J.* , 1987 , 319 : 850
- [ 12 ] Krumholz M R , McKee C F , Klein R I. *Astrophys. J.* , 2005 618L : 33
- [ 13 ] Bonnell I A , Bate M R , Zinnecker H. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* , 1998 , 298 : 93
- [ 14 ] Beuther H , Schilke P , Gueth F. *Astrophys. J.* , 2004 , 608 : 330
- [ 15 ] Zhang Q , Hunter T R , Brand J *et al.* *Astrophys. J.* , 2001 , 552L : 167
- [ 16 ] Blum R D , Barbosa C L , Daminieli A *et al.* *Astrophys. J.* , 2004 617 : 1167
- [ 17 ] Patel N A , Curiel S , Sridharan T K *et al.* *Nature* , 2005 , 437 : 109
- [ 18 ] Jiang Z , Tamura M , Fukagawa M *et al.* *Nature* , 2005 , 437 : 112
- [ 19 ] Jiang Z , Yao Y , Yang J *et al.* *Astrophys. J.* , 2003 , 596 : 1064
- [ 20 ] Bonnell I A , Vine S G , Bate M R. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* , 2004 , 349 : 735

## 作者简介



江治波 男 42 岁 博士 中国科学院紫金山天文台研究员。1984 年毕业于南京大学天文系 2002—2003 日本名古屋大学访问学者 从事星团及大质量恒星的研究工作 在国内外一级期刊上发表论文 10 余篇。在大质量年轻星 BN 天体方向发现了吸积盘 结果发表在 2005 年 9 月的 *Nature* 杂志上。



杨戟 男 45 岁 博士生导师 中国科学院紫金山天文台研究员。国家杰出青年科学基金获得者 中国科学院“百人计划”获得者 中国科学院射电天文重点实验室主任 紫金山天文台学术委员会主任。

1999—2004 年担任 973 项目“星系形成和演化”首席科学家助理和课题组长。先后在国内外专业杂志和会议文集上发表论文 60 多篇。

## · 招生招聘 ·



# Rensselaer

## 美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy , New York , U. S. A.

July , 2006

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy

Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy , Terascale Electronics , Photonic bandgap structures , nanoelectronic quantum structures , Bio-physics , Origins of Life , Astronomy , Elementary Particles Physics. Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

**Application** : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

**Information** : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

**Email** : [gradphysics@rpi.edu](mailto:gradphysics@rpi.edu)